УДК 621.313.017.7

ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ЗАКРЫТОГО ИСПОЛНЕНИЯ С ЕСТЕСТВЕННЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ И ОРЕБРЕННЫМ КОРПУСОМ

В.А. Жадан, С.В. Говязова

Томский политехнический университет
E-mail: zhadanva@tpu.ru

Представлена методика теплового расчета асинхронных двигателей закрытого исполнения с естественным охлаждением и оребренным корпусом, базирующаяся на результатах испытаний двигателей серии АРМ. Доказана возможность применения методики теплового расчета на стадии проектирования рольганговых двигателей новой серии 2АР. Приведено сравнение результатов тепловых испытаний опытных образцов двигателей серии 2АР и расчетов по предлагаемой методике.

Введение

Электрические машины общепромышленного назначения мощностью до 100 кВт обычно выполняют в закрытом обдуваемом или в брызгозащищенном исполнении, в которых применена искусственная циркуляция охлаждающего воздуха с помощью вентиляторов. Такие электрические машины имеют высокие технико-экономические показатели, благодаря чему они получили широкое распространение. Для теплового расчета таких электрических машин широко применяется метод эквивалентных тепловых схем [1, 2].

Однако, существует большое количество типов электрических машин закрытого исполнения, в которых по ряду причин невозможно создать искусственную циркуляцию охлаждающей среды. Это, прежде всего, некоторые типы электрических микромашин, а также электрические машины специального назначения, в частности, рольганговые асинхронные электродвигатели.

Рольганговые электродвигатели имеют станину с кольцевыми ребрами и оребренные подшипниковые щиты с вертикальными ребрами [3], охлаждаемые путем естественной конвекции и теплового излучения. Одним из главных факторов, влияющих на величину коэффициентов теплоотдачи естественной конвекцией и тепловым излучением, является температура корпуса, которая на стадии проектирования не известна.

С учетом изложенного применение известных методик теплового расчета [1, 2] без адаптации их к особенностям конструкции и к условиям эксплуатации рольганговых электродвигателей не допустимо.

Тепловое состояние асинхронных электродвигателей оценивается по величине среднего превышения температуры обмотки статора над температурой окружающей среды $\theta_м$. В промышленности для расчета $\theta_м$ применяется упрощенная формула

$$\theta_м = \frac{\Sigma p}{S_a \cdot \alpha_a}, \quad {}^\circ\mathrm{C}, \qquad (1)$$

где: Σp – суммарные потери электродвигателя, Вт; S_a – условная поверхность охлаждения активной части электродвигателя, м:

$$S_a = \pi D_a l_1 + \frac{\pi D_a^2}{2};$$

D_a – наружный диаметр сердечника статора, м; l_1 – длина сердечника статора, м; α_a – условный коэффициент теплоотдачи с условной поверхности охлаждения активной части двигателя, Вт/(м^2·K).

Недостаток этой методики состоит в том, что условный коэффициент теплоотдачи определяется экспериментально для каждого типоразмера двигателя на основе тепловых испытаний опытных образцов, поэтому формулу (1) нельзя использовать для оценки теплового состояния на стадии проектирования двигателя.

Особенности методики теплового расчета двигателей с естественным охлаждением

Методика теплового расчета рольганговых двигателей должна учитывать особенности конструкции корпуса двигателя и условия теплообмена между корпусом и окружающей средой.

При создании методики теплового расчета рольганговых двигателей за основу были взяты методики теплового расчета [2]:

- закрытых обдуваемых асинхронных двигателей при расчете внутренних тепловых сопротивлений и внутренних перепадов температуры, так как процессы внутреннего теплообмена в закрытых обдуваемых и не обдуваемых двигателях одинаковы;
- гладкого цилиндрического корпуса при естественном охлаждении, в которой применяется метод последовательных приближений, так как на стадии проектирования температура корпуса не известна, поэтому коэффициенты теплоотдачи при естественной конвекции и тепловом излучении не могут быть определены;

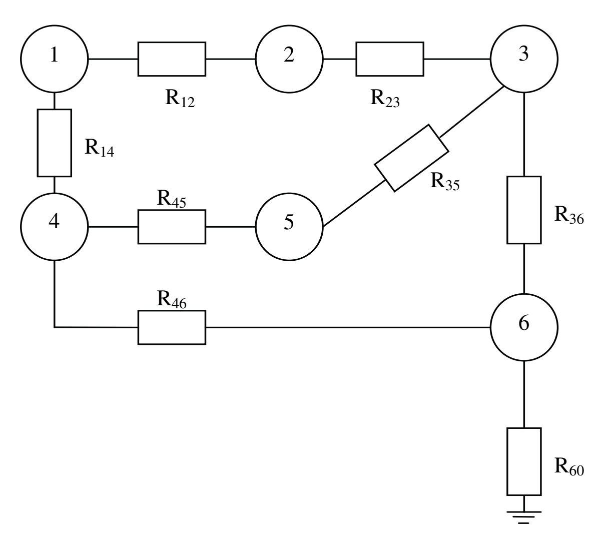


Рис. 1. *Упрощенная тепловая схема закрытого асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором: 1) лобовая часть обмотки статора; 2) пазовая часть обмотки статора; 3) сердечник статора; 4) внутренний воздух; 5) ротор; 6) корпус двигателя*

- расчета эффективности оребрения, адаптированная к особенностям оребрения рольганговых двигателей.

Предлагаемая методика теплового расчета базируется на упрощенной тепловой схеме замещения. Согласно этой методике двигатель подразделяется на 6 тел, рис. 1.

Расчет мощности источников теплоты

Потери в обмотке статора $P_{э1}$ распределены между телами 1 и 2 пропорционально длине пазовой (l_1) и лобовой ($l_л$) частей обмотки статора. Мощность P_3, представляет собой сумму основных потерь в стали $P_{ст}$ и половины добавочных потерь $P_{доб}$. Коэффициент добавочных потерь $k_д$ учитывает влияние технологических факторов. Мощность P_5, представляет собой сумму электрических потерь в обмотке ротора $P_{э2}$ и половины добавочных потеть. Мощность P_4, представляет собой часть механических потерь $P_{мех}$, затраченных на внутреннюю вентиляцию. Мощность P_6, представляет собой часть механических потерь $P_{мех}$, затраченных на трение в подшипниках. Предполагается, что остальная часть механических потерь затрачивается в наружном вентиляторе и не участвует в повышении температуры внутренних частей двигателя.

Мощности источников теплоты:

$$\left.\begin{aligned} &P_1 = P_{э1}\frac{l_л}{l_1 + l_л};\\ &P_2 = P_{э1} - P_1;\\ &P_3 = P_{ст} + 0{,}5k_Д P_{доб};\\ &P_4 = P_6 = P_{мех}/4;\\ &P_5 = P_{э2} + 0{,}5k_Д P_{доб}. \end{aligned}\right\} \qquad (2)$$

Внутренние тепловые сопротивления

Расчет внутренних тепловых сопротивлений R_{12}, R_{14}, R_{23}, R_{35}, R_{36}, R_{45}, R_{46}, производится в соответствии с методикой расчета закрытых обдуваемых двигателей [2] и в данной статье не приводится. Отличие предлагаемой методики от базовой состоит в определении превышения температуры корпуса двигателя θ_6 на тепловом сопротивлении R_{60} между корпусом и наружным воздухом.

Расчет теплоотдачи корпуса и его превышения температуры θ_6

Суммарный коэффициент теплоотдачи корпуса в спокойной воздух за счет естественной конвекции и теплового излучения зависит от превышения температуры корпуса θ_6, которая пока не известна, над температурой окружающей среды ϑ_0, состояния поверхности корпуса и геометрии оребрения станины и подшипниковых щитов. Для определения перепада температуры θ_6 воспользуемся методом последовательных приближений.

Задаемся ориентировочно значением суммарного коэффициента теплоотдачи α_Σ и рассчитаем общую тепловую проводимость корпуса

$$\Lambda_{60} = \alpha_\Sigma (S_{ст} + S_{щ}), \quad \text{Вт/К}; \qquad (3)$$

где α_Σ – суммарный коэффициент теплоотдачи, ориентировочно α_Σ=10...15 Вт/(м^2·K); $S_{ст}$ – площадь поверхности охлаждения станины, м^2;

$$S_{ст} = S_{ст.гл} + k_{эф} S_{ст.р};$$

где $S_{ст.гл}$ – площадь гладкой поверхности охлаждения станины, м^2;

$$S_{ст.гл} = \pi D_{ст} L_{ст},$$

$S_{ст.р}$ – площадь гладкой поверхности охлаждения ребер станины, м^2;

$$S_{ст.р} = 2N_{рс} \pi (D_{ст} + h_{рс}) h_{рс},$$

$N_{рс}$ – количество ребер на станине; $D_{ст}$ – наружный диаметр станины по основаниям ребер, м; $h_{рс}$ – высота ребер станины, м.

Коэффициент теплоотдачи с поверхности ребер зависит от густоты ребер и коэффициента теплопроводности материала $\lambda_{ст}$, из которого они выполнены. Для оценки ухудшения теплоотвода по сравнению с идеальным случаем, когда влияние густоты ребер не учитывается и теплопроводность ребра была идеальной (λ=∞), воспользуемся коэффициентом эффективности оребрения [2]:

$$k_{эф} = \frac{1}{mh}\left(1 - \frac{2}{e^{2mh} + 1}\right);$$

где mh – коэффициент поля;

$$mh = h_p \sqrt{2\alpha_\Sigma / b_p \lambda_{ст}};$$

b_p – средняя ширина трапециевидного ребра, м; $\lambda_{ст}$– коэффициент теплопроводности материала, из которого выполнено ребро, Вт/(м·К); $S_щ$ – площадь поверхности охлаждения подшипниковых щитов, м^2:

$$S_щ = \frac{\pi}{2} D_{ст}^2 + k_{эф} S_{щр};$$

где $S_{щр}$ – площадь поверхности охлаждения ребер подшипникового щита, м^2.

Начальное значение превышения температуры корпуса:

$$\theta_{60} = \frac{\Sigma P}{\Lambda_{60}}, \quad °\text{C}, \qquad (4)$$

где: $\Sigma P = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5$ – суммарные греющие потери в двигателе, Вт, по (2); Λ_{60} – ориентировочное значение тепловой проводимости корпуса, по (3).

Коэффициент теплоотдачи при естественной конвекции

Расчетные формулы для определения коэффициента теплоотдачи при естественной конвекции $\alpha_к$ зависят от режима течения, определяемого произведением критериев Грасгофа Gr и Прандтля Pr

$$\text{Gr} \cdot \text{Pr} = \frac{g\beta}{\upsilon^2} l^3 \vartheta \cdot \frac{\upsilon}{a}; \qquad (5)$$

где β – объемной коэффициент температурного расширения воздуха, К$^{-1}$; υ – коэффициент кинематической вязкости воздуха, м^2/с; l – определяющей размер, м; ϑ – определяющая температура, °С; a – коэффициент температуропроводности, м^2/с.

В качестве определяющего размера в (5) принимаем габаритную высоту двигателя. Исходя из рассчитанного в нулевом приближении превышения температуры корпуса θ_{60} по формуле (4) находим среднюю температуру поверхности корпуса, °С:

$$\vartheta_п = \vartheta_0 + \vartheta_{60}.$$

Определяющая температура, по которой выбираются теплофизические константы воздуха в формуле (5), равна средней температуре поверхности корпуса и окружающей среды, °С:

$$\vartheta_{ср} = (\vartheta_п + \vartheta_0)/2.$$

В зависимости от величины произведения (Gr·Pr) по табл. 1 устанавливаем режим течения и расчетные формулы для коэффициента теплоотдачи $\alpha_к$ при естественной конвекции. Коэффициенты в расчетных формулах табл. 1 приведены в табл. 2.

Таблица 1. *Коэффициенты теплоотдачи естественной конвекции при различных режимах течениях*

Значения произведения Gr·Pr	Режим теплопередачи	Расчетная формула
До 10^{-3}	Теплопроводность в неподвижной среде (пленочный режим)	$\alpha_k = A_0/(l \cdot 10^2)$
$10^{-3}...5\cdot10^2$	Теплопроводность при слабом ламинарном течении	$\alpha_k = A_1 \theta_6^{1/8} l^{-5/8}$
$5\cdot10^2...2\cdot10^7$	Ламинарный режим	$\alpha_k = A_2(\theta_6/l)^{1/4}$
$2\cdot10^7...10^{12}$	Турбулентный режим	$\alpha_k = A_3 \theta_6^{1/3}$

Таблица 2. *Коэффициенты A_0, A_1, A_2, A_3 при естественной конвекции [2]*

$\vartheta_{ср}$, °С	A_0	A_1	A_2	A_3
0	1,1	0,29	1,39	1,66
40	1,32	0,30	1,33	1,50
80	1,46	0,31	1,28	1,39
120	1,60	0,32	1,24	1,29
160	1,72	0,37	1,20	1,21

Коэффициент теплоотдачи излучением

Коэффициент теплоотдачи излучением $\alpha_л$ зависит от степени черноты излучающего тела (поверхности корпуса) ε_1 и определяется по закону Стефана-Больцмана

$$\alpha_л = \frac{5,67 \cdot 10^{-8} \varepsilon_1 [T_п^4 - T_0^4]}{T_п - T_0}, \quad \text{Вт/(м}^2 \cdot \text{К)},$$

где $T_п = \vartheta_п + 273$ и $T_0 = \vartheta_0 + 273$ – абсолютная температура поверхности корпуса и окружающей среды, К.

Уточненная тепловая проводимость корпуса после первого приближения:

$$\Lambda_{61} = \alpha_к (S_{ст} + S_щ) + \alpha_л S_л,$$

где $S_л$ – площадь «обтягивающей» поверхности корпуса, м.

Расчетное превышение температуры для первого приближения:

$$\theta_{61} = \frac{\Sigma P}{\Lambda_{61}};$$

и его невязка:

$$\Delta_1 = \theta_{60} - \theta_{61}.$$

Ориентируясь на θ_{61} и невязку Δ_1, принимаем превышение температуры θ_{62} для второго приближения и повторяем расчет.

Блок-схема теплового расчета закрытых асинхронных двигателей с оребренной станиной и подшипниковыми щитами при естественной конвекции и тепловом излучении представлена на рис. 2.

Расчет заканчивается, когда невязка Δ_{i+1} станет меньше заданной погрешности расчета σ:

$$\Delta_{i+1} = \theta_{6i} - \theta_{6(i+1)} \le \sigma.$$

Расчет тепловой схемы

Ввиду малого числа контуров в тепловой схеме наиболее удобен метод преобразований при оперирова-

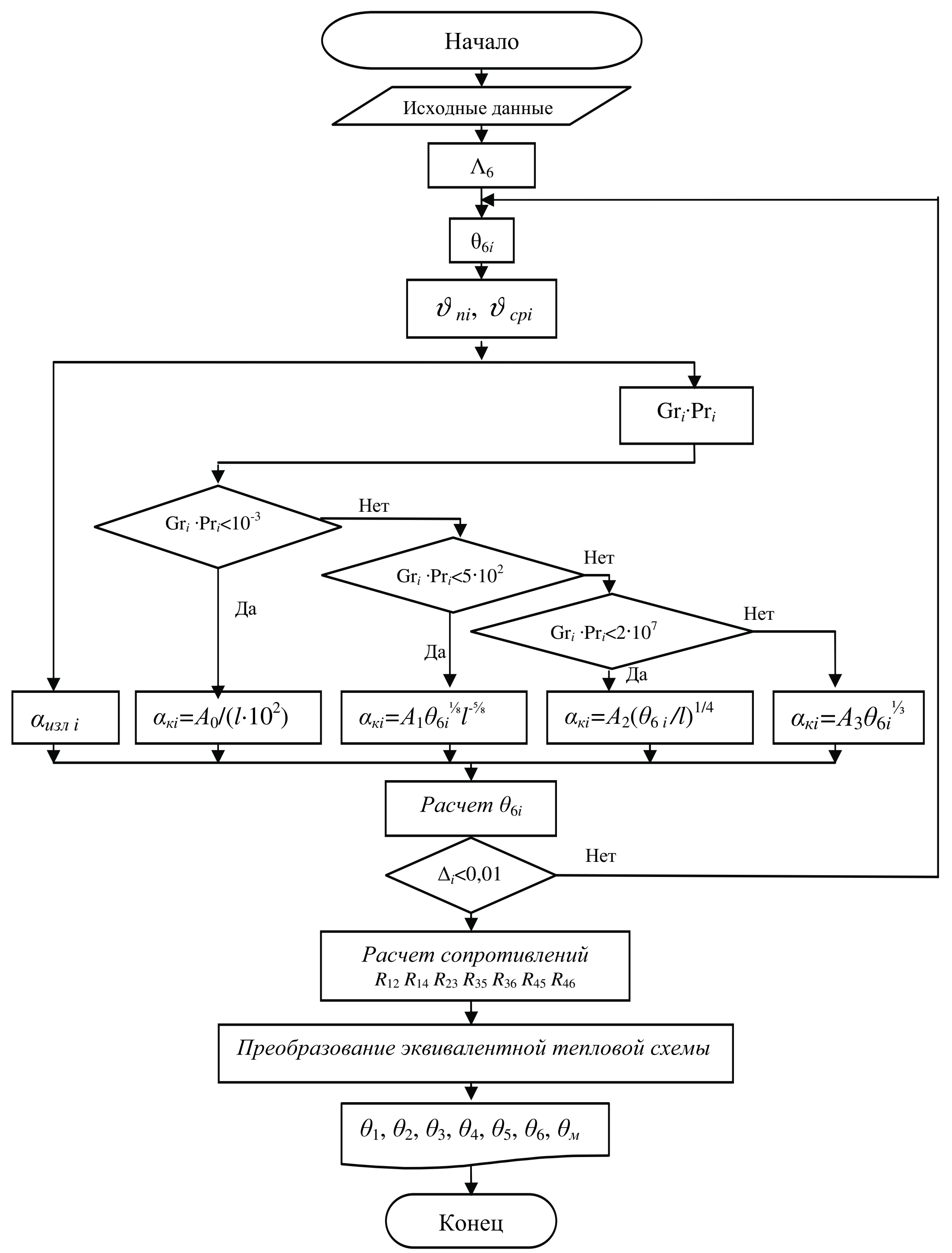


Рис. 2. *Блок-схема расчета закрытых асинхронных двигателей при естественной конвекции и тепловом излучении*

Таблица 3. *Сравнение результатов расчётов и тепловых испытаний рольганговых двигателей серии 2АР*

Тип двигателя		2АР112							2АР160		2АР132							2АР180	
		МА4	МВ4	МА8	МВ8	МА10	МА12	LA8	LB8	LB10	МА6	МВ6	МА8	МВ8	МА10	МА12	МВ12	LA10	LA12
Опыт	$P_{мех}$, Вт	28	34	33	58	42	15	21	40	24	40	24	41	44	14	34	20	55	62
	$P_{ст}$, Вт	54	85	48	71	63	65	166	238	246	128	228	118	213	131	103	229	349	355
	$P_{э1}$, Вт	78	108	102	188	139	195	269	270	404	192	154	173	287	211	288	479	923	1040
	$PЭ_2$, Вт	193	352	108	217	86	65	642	469	455	426	415	286	365	179	184	363	594	557
	$\theta_{м\ опыт}$, °С	61	93,5	59	89	65,5	68,5	80,7	72	82	91,5	79	74	92,5	64	78,6	104	101,3	104
Расчет	$\theta_{м\ рас}$, °С	63,3	93,4	57,2	93,2	63,1	70,4	82,1	69,9	77,4	88	80,8	71,2	93	63,9	74,6	111,1	105,7	110,3
	$\theta_{5рас}$, °С	91,9	138,6	74,4	118,5	74,7	75,3	140,4	105,7	112	140,5	117,2	108	131,1	86	96,5	145,8	142	143,9
	$\theta_{6рас}$, °С	48,5	72,3	41	67,8	43	45,5	59,5	52,7	57	66,6	63,7	53,1	69,6	45,7	52,7	80,6	74,9	76,7
	$\Delta\theta_м$, %	-3,7	0,1	3,0	-4,7	3,7	-2,8	-1,7	2,9	5,6	3,8	-2,3	3,9	-0,5	0,16	5,09	-6,83	-4,34	-6,06

нии тепловыми сопротивлениями и определении превышений температуры в каждом теле, изложенный в [2]. Поскольку при проведении тепловых испытаний определяется среднее превышение температуры обмотки статора $\theta_{м\ опыт}$ над температурой окружающей среды, то среднее расчетное превышение температуры обмотки статора $\theta_{м\ рас}$ определяется по формуле:

$$\theta_{м\ рас} = (\theta_1 l_л + \theta_2 l_1)/(l_л + l_1).$$

Оценка погрешности методики

При разработке методики теплового расчета были использованы результаты приемо-сдаточных испытаний рольганговых двигателей серии АРМ, проведенных ОАО «СКБ Сибэлектромотор»: механические потери $P_{мех}$, основные потери в стали $P_{ст}$, электрические потери в обмотках статора $P_{э1}$ и ротора $P_{э2}$ и среднее превышение температуры обмотки статора $\theta_{м\ опыт}$. Сравнение результатов тепловых испытаний и расчетов по предлагаемой методике 42 типоразмеров двигателей серии АРМ показало, что погрешность расчета среднего превышения температуры обмотки статора не превышает ±5 %.

Методика теплового расчета прошла опытную проверку при проектировании новой серии рольганговых двигателей серии 2АР, имеющих иные геометрические размеры и параметры оребрения [4]. В табл. 3 приведены результаты испытаний опытных образцов двигателей серии 2АР и расчетов по предлагаемой методике.

Проверка погрешности методики проводилась следующим образом. Мощность источников тепла по выражению (3) определялась на основе действительных потерь мощности, имеющих место при испытании двигателей. Рассчитывались средние превышения температуры обмотки статора $\theta_{м\ рас.}$, средние превышения температуры ротора $\theta_{ротора}=\theta_{5\ рас.}$, корпуса $\theta_{кор}=\theta_{6\ рас.}$ и погрешность методики $\Delta\theta_м$ при расчете среднего превышения температуры обмотки статора (табл. 3). Погрешность методики теплового расчета рольганговых двигателей новой серии 2АР не превышает 7 %.

Выводы

1. Упрощенная тепловая схема адекватно отражает физические процессы, происходящие в электродвигателе закрытого исполнения с естественным охлаждением.
2. Методика расчета эффективности оребрения корпусов обдуваемых асинхронных двигателей вполне пригодна для расчета эффективности оребрения корпусов двигателей с естественным охлаждением.
3. Предлагаемая методика теплового расчета электрических машин с естественной системой охлаждения и оребренным корпусом с достаточной точностью учитывает изменение геометрических размеров и параметров оребрения корпуса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борисенко А.И., Костиков О.Н., Яковлев А.И. Охлаждение промышленных электрических машин. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 206 с.: ил.
2. Сипайлов Г.А., Санников Д.И., Жадан В.А. Тепловые, гидравлические и аэродинамические расчеты в электрических машинах. – М.: Высшая школа, 1989. – 239 с.: ил.
3. Шелехов С.А., Шелехова Т.С. Рольганговые электродвигатели серии АР. – М.: Энергия, 1977. – 184 с.: ил.
4. Жадан В.А, Баранов П.Р. Асинхронные рольганговые электродвигатели серии 2АР. Перспективы применения в оборудовании металлургической промышленности // Национальная металлургия. Технический альманах. Оборудование. – 2004. – № 1. – С. 9–12.